

Perfil ambiental de la industria azucarera de la provincia de Tucumán obtenido a partir de la técnica del Análisis del Ciclo de Vida

Andrea L. Nishihara Hun¹, Fernando D. Mele¹ y Gonzalo A. Pérez²

1- UNT, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología. 2- INTA, Centro Regional Tucumán-Santiago del Estero. Correo-e: fmele@herrera.unt.edu.ar

INTRODUCCIÓN

La industria del azúcar es una importante actividad a nivel mundial. Durante la campaña 2009/2010, se produjeron 1.683 millones de toneladas de caña de azúcar en el mundo. De los 115 países productores de azúcar, 67 de ellos la producen a partir de caña de azúcar, 39 a partir de remolacha y 9 de caña y remolacha (4). El azúcar de caña se produce principalmente en América y Asia, mientras que el de remolacha se produce principalmente en Europa y, en menor cuantía, en Norteamérica. Hacia 1980, la materia prima para la producción de azúcar era la caña y la remolacha en partes iguales, mientras que en la actualidad, el 80% de la producción mundial de azúcar y gran parte del etanol combustible provienen del cultivo de caña, siendo éste el único que se desarrolla en nuestro país.

La producción mundial de azúcar durante la campaña 2013/2014 ascendió a casi 176 millones de toneladas, un 1% menor que la campaña anterior (12). A nivel mundial, Brasil y la India ocupan los primeros puestos como productores de azúcar; la Argentina ocupa la posición número 18, con un nivel de producción muy similar a Indonesia, Filipinas, Colombia y Sudáfrica (4).

La producción de caña de azúcar en la Argentina se concentra en tres zonas: Tucumán, el Norte (Salta y Jujuy) y el Litoral. Actualmente funcionan 23 ingenios azucareros, de los cuales quince están concentrados en Tucumán, tres en Jujuy, dos en Salta, dos en Santa Fe y uno en Misiones (3). El área cañera de Tucumán abarca alrededor de 250.000 ha y el azúcar producida representó en la última campaña un 65,1% de la producción nacional (8).

La caña de azúcar se destaca por su importancia socio-económica. En las zonas de su cultivo se observa una mayor industrialización y una ampliación de la infraestructura productiva, que genera un incremento en el número de empleos, especialmente en la época de cosecha (zafra). Además, el sector azucarero es dinamizador de diversas actividades que se desarrollan en torno a la agroindustria, comercialización y sistemas de abastecimiento.

Hasta hace unos años, los ingenios solamente producían azúcar, pero hoy en día la mayoría de estas industrias incluye la producción de azúcar, etanol y energía, entre otros productos.

En este trabajo se propone evaluar los impactos ambientales de la actividad sucroalcoholera tucumana usando la metodología conocida como Análisis del Ciclo de Vida (*Life Cycle Assessment*, LCA por sus siglas en inglés). Ésta es una herramienta reciente, en continuo desarrollo, considerada como una de las mejores opciones a la hora de considerar los efectos ambientales en el ecosistema y en los humanos (6). La SETAC (19) define el LCA como: “un proceso para evaluar las cargas ambientales asociadas a un producto, proceso o actividad identificando y cuantificando el uso de materia y energía y los vertidos al entorno; para determinar el impacto que ese uso de recursos y esos vertidos producen en el medio ambiente, y para evaluar y llevar a la práctica estrategias de mejora ambiental. El estudio incluye el ciclo completo del producto, proceso o actividad, teniendo en cuenta las etapas de extracción y procesamiento de materias primas; producción, transporte y distribución; uso, reutilización y mantenimiento; y reciclado y disposición del residuo.” Este enfoque se conoce como “de la cuna a la tumba”.

Es de destacar la gran cantidad de trabajos de LCA que han aparecido a nivel mundial en los últimos años. No obstante, en la Argentina se evidencian escasas investigaciones en el sector de la caña de azúcar (13, 1, 15), constituyendo el presente trabajo una contribución importante en una temática innovadora.

A continuación se describe la aplicación de la metodología, el sistema que se tomó bajo estudio y finalmente se discuten los resultados obtenidos.

MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología aplicada en este estudio sigue los lineamientos de la norma ISO 14040 y 14044 sobre LCA (10, 11). Un estudio de LCA consta de cuatro fases interrelacionadas: la Fase I trata de

la definición de los objetivos y alcance del estudio; la Fase II es el análisis de inventario; la Fase III, la evaluación de impacto ambiental y la Fase IV corresponde a la interpretación de los resultados. En el marco de la Fase I, se ha definido como objetivo del estudio la obtención del perfil ambiental del azúcar y el alcohol obtenidos a partir de caña de azúcar en la provincia de Tucumán. En cuanto al alcance, se ha considerado un análisis “de la cuna a la puerta” que abarca las actividades de la cadena productiva, desde la extracción de las materia primas (etapa agrícola) hasta la obtención de los productos en la puerta de las fábricas (ingenios azucareros y destilerías). En los límites del sistema no se han incluido tareas de almacenamiento, transporte de los productos finales y su uso. La descripción del sistema y los datos de inventario han sido los vigentes para la industria de la caña en el noroeste argentino (NOA) durante el año 2013, ya que se asume que las tecnologías, precios y métodos de producción pueden cambiar en el mediano plazo. Dentro de lo posible, los límites del sistema se expandieron para incluir el impacto asociado con la producción de todos los insumos (ej.: fertilizantes, cal, ácido sulfúrico, etc.). Sólo se usó un criterio de asignación de impactos ambientales cuando fue estrictamente necesario ya que las ISO 14040 recomiendan subdividir el sistema o expandir sus límites para evitar esta asignación. La unidad funcional (FU) del estudio se ha plasmado en un flujo de referencia de 1 kg de azúcar blanco producido, a granel listo para envasar.

Los datos para construir el inventario de ciclo de vida (LCI), Fase II, se han obtenido de diferentes fuentes. La información es la más ajustada posible al contexto argentino, a pesar de que al presente los datos de inventario de la actividad sucroalcoholera no están completamente disponibles en una base de datos unificada. La información relacionada con las tareas agrícolas se obtuvo de productores locales, de técnicos de INTA y otras instituciones gubernamentales. Para la etapa industrial, se consideraron coeficientes de balance de masa y energía estándares comunicados por expertos de la UNT, de ingenios y destilerías de la provincia. Los vacíos se han cubierto usando literatura específica, manuales y bases de datos -entre ellas Ecoinvent 3 (7)-, todas fuentes debidamente referenciados a la hora de mostrar los resultados de LCI. Parte de estos datos ya han sido usados en trabajos previos de los autores (13, 1, 15).

Para la realización de la evaluación de impacto de ciclo de vida (LCIA) del estudio, Fase III, se ha elegido el modelo de impacto CML2000 Baseline (5), uno de los métodos de evaluación de impacto de punto medio más ampliamente usado. Los cálculos se hicieron con el soporte del programa de software Simapro® 8.0.3 (PRé Consultants bv).

CASO DE ESTUDIO

El sistema bajo estudio se ha dividido a su vez en tres subsistemas: AGRICULTURA, INGENIO y DESTILERÍA, tal como se muestra en la Figura 1.

AGRICULTURA

El sistema AGRICULTURA incluye todas las actividades que intervienen en la producción agrícola de la caña de azúcar. En la provincia de Tucumán, la producción de este cultivo se desarrolla siguiendo prácticas que han sido clasificadas por Giancola *et al.* (9) en tres niveles tecnológicos: alto, medio y bajo, repartidos en un 40, 50 y 10%, respectivamente, de la superficie implantada. En general, en la provincia predomina el sistema de plantación manual, uso de agroquímicos convencionales y cosecha integral en verde (cosecha de caña en pie). El rendimiento considerado fue de 70 t caña bruta/ha que corresponde a 61 t caña molible/ha, valor basado en el rendimiento promedio de los años 2009 a 2013 en la provincia de Tucumán (8).

El sistema AGRICULTURA se representó como un proceso unitario con el nombre CAÑA TOTAL. Siguiendo los lineamientos de la Fase II de un estudio de LCA, se relevaron todos los procesos que contribuyen a CAÑA TOTAL. Éstos son tres entradas de la tecnósfera que se muestran en la Figura 2: Caña PLANTA, Caña SOCA y COSECHA. Como salidas de este proceso se considera el producto caña como tallos molibles en la entrada del ingenio, y las emisiones debidas a la quema pre y postcosecha del residuo agrícola de cosecha (RAC). La proporción 1:4 de caña planta/caña soca obedece a la práctica habitual de renovación parcial del cañaveral.

A modo de ejemplo, se describe el proceso unitario Caña PLANTA (véase la Figura 3). Este proceso tiene como entradas y salidas una serie de flujos que tienen que ver con la absorción de CO₂ neta en el balance fotosíntesis-respiración, la ocupación de la tierra, el uso de agua para diferentes

actividades (riego, lavado de maquinarias, dilución de agroquímicos), infraestructura (construcción y uso de maquinaria e instalaciones) y aplicación de agroquímicos.

La absorción de CO₂ fue calculada en 50,72 t CO₂/ha teniendo en cuenta el balance de carbono propuesto por Beeharry (2). Las labores asociadas a caña semilla no se han tenido en cuenta por considerarlas despreciables frente a las otras labores del campo.

El cultivo incluye la infraestructura más combustible usado en las labores de rastrado, cincelada, surcado, tapado y desboquillado correspondientes a la preparación de suelo y las labores de bajada de bordo durante el cultivo. La infraestructura incluye los tractores (máquinas móviles), la maquinaria (no móviles) y los galpones. Por razones de espacio, la enorme cantidad de datos de inventario utilizados no se consignan en el trabajo pero se encuentra a disposición del lector interesado.

Para las tareas de pulverización de Caña PLANTA, se considera infraestructura más combustible asociados a la aplicación de agroquímicos. En cuanto a los agroquímicos en sí, se ha utilizado información proporcionada por los productores en lo relacionado a dosis, envases y agua de dilución (Cuadro 1).

A lo largo de todo el estudio, los procesos de obtención y distribución de diésel y electricidad se han adaptado lo máximo posible a las características de la Argentina tomando como punto de partida los datos de los procesos respectivos existentes en la base de datos Ecoinvent 3 (7). Se ha considerado la siguiente composición de la matriz energética argentina: carbón (1,8%), diésel (2,9%), petróleo (9,4%), gas natural (44,5%), hidroeléctrica (35,5%) y nuclear (5,9%) (18).

Del mismo modo que para Caña PLANTA, el análisis incluye toda la información referida a Caña SOCA, la cual no se reporta en este informe.

Respecto del proceso COSECHA, se ha incluido toda aquella información relacionada con la infraestructura más combustible usados durante la cosecha, teniendo en cuenta una ponderación, según el nivel tecnológico, por el tipo de cosecha: manual, semi-mecanizada y mecanizada integral en verde.

Las emisiones intrínsecas del proceso unitario CAÑA TOTAL provienen principalmente de las emisiones por la quema del RAC. Otra fuente de emisiones tiene como origen la transformación que sufren los agroquímicos una vez aplicados: desnitrificación, volatilización, lixiviación (*leaching*) y escurrimiento (*run-off*). Los valores adoptados (Cuadro 2) coinciden con los propuestos en Ecoinvent 3.

Se trabajó con la suposición de que entre precosecha y postcosecha se quema el 50% del RAC generado; el resto se deja como cobertura sobre el suelo. El total de CO₂ se estimó mediante cálculos de combustión teniendo en cuenta la composición de este material.

INGENIO

La caña de azúcar producida en el campo es transportada, luego de la cosecha, hacia el ingenio para ser utilizada como materia prima para la producción de azúcar. La Figura 4 muestra un esquema de las transformaciones que ocurren en el sistema INGENIO.

El proceso productivo comienza con el troceado, desmenuzado y posterior molienda de la caña en el trapiche, donde a través de sucesivos prensados y con el agregado de agua de imbibición se separan dos productos. Por un lado se obtiene el jugo que contiene el azúcar (sacarosa) a recuperar en el proceso, y por otro lado el bagazo, que es la parte fibrosa de la caña, que retiene cierta humedad y sacarosa.

El bagazo se utiliza como combustible para generar vapor en las calderas. El vapor se usa en toda la planta fabril para producir trabajo en turbinas de generación de energía eléctrica, en el trapiche, en bombas y ventiladores de caldera. El vapor de escape que sale de las máquinas de potencia se usa como fluido calefactor en ciertas secciones del proceso tales como en la evaporación.

El jugo, previo filtrado para eliminar los sólidos gruesos, se somete a un tratamiento fisicoquímico conocido como clarificación para eliminar las sustancias que interfieren en la cristalización de la sacarosa. Esto se consigue a través de los siguientes procesos: sulfitación, encalado, calentamiento, decantación y filtrado de los lodos. Durante la sulfitación se agrega dióxido de azufre al jugo; durante el encalado se neutraliza el jugo sulfitado agregando lechada de cal y durante el calentamiento se eleva la temperatura del jugo para insolubilizar las sales de calcio formadas y disminuir la viscosidad del jugo facilitando la separación de los sólidos por decantación. Los lodos

separados en la decantación son enviados a filtros rotativos o de bandas para recuperar la mayor parte de jugo que pudieran haber arrastrado, el cual se recircula al proceso de clarificación. El sólido seco residual -denominado cachaza- se dispone en el campo.

El jugo clarificado (12% peso de sólidos disueltos) se concentra por evaporación para obtener el melado, una solución principalmente de sacarosa de uno 65% en peso. El sistema de evaporación consiste en un tren de evaporadores continuos de cuatro o cinco efectos que trabaja al vacío.

El melado pasa a la sección de cocimientos donde se produce la cristalización del azúcar y su separación de las mieles madres. El sistema de cocimiento considerado es el más habitual en los ingenios tucumanos: de tres templas. En este sistema, la cristalización se produce en una serie de tres tachos de cocimiento donde se efectúan cristalizaciones sucesivas de las mieles y que al final del proceso rinden azúcar blanco, azúcar crudo y una miel de tercera o miel final conocida como melaza. La melaza es la materia prima para la producción de etanol.

Por lo tanto, las salidas con valor económico del sistema ingenio son azúcar blanco, azúcar crudo y melaza. Por tratarse de un sistema multi-producto, se debe considerar un criterio de asignación de cargas ambientales sobre los productos. En este caso se calculó un factor de asignación con el criterio de la masa producida de cada uno de los co-productos.

$$f_{az.bco.} = \frac{masa_{az.bco.}}{masa_{az.bco.} + masa_{az.crudo} + masa_{melaza}} \times 100$$

Las entradas y salidas del sistema INGENIO se esquematizan en la Figura 5. Entre las salidas se encuentran los tres co-productos ya mencionados, a los cuales se suman la cachaza que sale del proceso de clarificación, el exceso de bagazo, las cenizas de caldera y la electricidad generada.

Las cenizas (2,4% de caña) y la cachaza (4,05% de caña) no se han considerado como salidas netas porque se ha supuesto, siguiendo la práctica habitual, que se reciclan completamente al campo. La generación de electricidad para la red se considera inexistente dado que sólo uno de los ingenios del medio actualmente vende electricidad a la red y lo hace de manera intermitente. No se ha considerado excedente de bagazo sino que el total generado en la molienda se quema en caldera.

De la estadísticas del Centro Azucarero Argentino (3) surge que el rendimiento de azúcar blanco y azúcar crudo por cada 100 toneladas de caña molida es de 8,322 t y 1,414 t, respectivamente. El rendimiento de melaza se ha tomado del 4%, respecto de caña molida (Figura 6). Los valores del factor de asignación para azúcar blanco, azúcar crudo y melaza resultan, entonces: 60,6, 10,3 y 29,1%, respectivamente.

Como entradas adicionales al sistema INGENIO, además de la caña proveniente del sistema AGRICULTURA, se encuentra el proceso de Transporte (infraestructura más combustible), el agua para todos los procesos, la energía (gas natural y electricidad de la red externa), e insumos del proceso de fabricación de azúcar. El consumo de electricidad y gas natural tienen que ver con las necesidades energéticas que por zafra no cubre el bagazo. Sus valores se tomaron de comunicaciones personales con la Secretaría de Medio Ambiente de Tucumán. Entre los insumos se ha incluido: azufre, cal, lubricantes, floculantes y ácido fosfórico (Cuadro 3).

Respecto de las emisiones del sistema INGENIO, se han considerado aquellas derivadas de la combustión en calderas, del gas natural y el bagazo. Para ello se ha tenido en cuenta la composición centesimal de cada uno de los combustibles. En el caso del gas natural se ha considerado combustión completa mientras que en el caso del bagazo se ha considerado un análisis real de los gases de chimenea. En ambos casos se consideró el uso de filtros húmedos (*scrubbers*) para los gases de combustión. El resultado final de emisiones al aire en kg/kg azúcar blanco se muestra en el Cuadro 4.

DESTILERÍA

Las destilerías de Tucumán operan asociadas a los ingenios azucareros, es decir que comparten en gran medida sus servicios auxiliares y usan como materia prima la melaza que se genera como co-producto de la fabricación de azúcar (Figura 1).

La melaza (85% sólidos totales en peso) se diluye con agua y se enriquece con fuentes de N y P para que las levaduras fermenten los azúcares y produzcan alcohol etílico. Se ha considerado el sistema de fermentación discontinua en tanques abiertos llamados cubas de fermentación. Al cabo de unas 12 h, el mosto se convierte en mosto fermentado o vino con una concentración de etanol de entre 7-10 °GL (°GL = % de etanol en volumen). El vino se centrifuga para recuperar la levadura –la cual luego será reutilizada–, y se envía a tanques pulmón desde donde se alimentan las columnas de destilación que recuperarán y concentrarán el etanol producido.

El vino sin levaduras se destila en trenes de columnas de destilación que separan las impurezas hasta dar como producto el etanol 96 °GL o etanol buen gusto, cuyo contenido de agua es cercano al de la mezcla azeotrópica. El esquema de destilación consta normalmente de 2 ó 3 columnas. Además del alcohol buen gusto se obtiene un etanol de baja pureza conocido como alcohol mal gusto y aceite de fusel, que es una mezcla constituida principalmente por alcoholes superiores. Como residuos, en esta etapa de destilación se genera la vinaza y la flegmasa. La vinaza constituye el residuo más importante de la destilería; tiene elevado contenido de sales y carga orgánica, y se genera en grandes volúmenes. La flegmasa es prácticamente agua.

Para obtener alcohol anhidro grado combustible, el alcohol buen gusto pasa a una etapa de deshidratación que puede llevarse a cabo empleando diferentes técnicas. En este estudio se ha considerado la deshidratación mediante destilación azeotrópica usando ciclohexano como solvente. El etanol final tiene una concentración mayor a 99,7 °GL.

Las entradas y salidas del sistema DESTILERÍA se esquematizan en la Figura 7. El producto principal del sistema es el etanol anhidro. Se ha supuesto que el etanol mal gusto y el fusel no salen del sistema sino que se mezclan para ir a la deshidratación; esto hace innecesaria la asignación de cargas ambientales. Del promedio de producción de etanol de la zafra 2013 surge que la producción de etanol anhidro es de 14,68 L/t caña (11,587 kg/t caña).

De entre las entradas del sistema DESTILERÍA destaca la melaza, que trae consigo toda la carga ambiental “heredada” de los sistemas INGENIO y AGRICULTURA antes descritos. Los insumos (Cuadro 3) incluyen el consumo de agua, levadura, urea, antibióticos, ácido sulfúrico y ciclohexano para la deshidratación. Las necesidades energéticas se satisfacen mayormente con la combustión del bagazo en calderas, siendo necesario contabilizar sólo una pequeña cantidad de electricidad de la red.

Con respecto a las emisiones al aire de este subsistema, se han considerado principalmente dos: el CO₂ producto de la fermentación y el etanol que se pierde por evaporación al trabajar con cubas abiertas.

La vinaza, el principal efluente del proceso, puede recibir diferentes tratamientos para reducir su carga contaminante, sin embargo ninguno de estos tratamientos está generalizado en la provincia y el destino más común de las vinazas es su disposición en los campos de cultivo o en terrenos de sacrificio. La generación de vinazas para este estudio se ha tomado en 10 L/L etanol. Por otro lado, no se ha encontrado información sobre la movilidad de los componentes de la vinaza en el suelo haciéndose difícil la estimación de su efecto ambiental. Sí se tuvo en cuenta la transformación del carbono contenido en la vinaza en gases de efecto invernadero.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con los datos de inventario, usando los factores de caracterización dado por el modelo CML2000 Baseline, se han evaluado las 10 categorías de impacto que define este modelo: destrucción de la capa de ozono (OP), toxicidad humana (THP), ecotoxicidad acuática de agua fresca (EAF), ecotoxicidad acuática marina (EAM), ecotoxicidad terrestre (ET), oxidación fotoquímica (POP), calentamiento global (GWP), acidificación (AP), agotamiento de recursos abióticos (ARA) y eutrofización (NP).

Los resultados pueden verse en las Figura 8 a 11. Estas figuras representan los perfiles ambientales de los diferentes subsistemas de la siguiente manera: en abscisas aparecen las 10 categorías de impacto ambiental del modelo CML, mientras que en ordenadas se representa el porcentaje de contribución de los diferentes procesos al sistema bajo análisis.

La Figura 8 corresponde al perfil ambiental de la caña de azúcar cosechada, en la entrada del ingenio. Se observa que desde el punto de vista de calentamiento global, hay un impacto ambiental “positivo”, gracias al consumo de dióxido de carbono durante el desarrollo de la caña de azúcar

(fotosíntesis). Como es de esperar, en todas las categorías se observa la contribución mayor del proceso Caña SOCA respecto de Caña PLANTA, al proceso de producción de caña.

La Figura 9 muestra las contribuciones a las categorías de impacto de la caña soca. El sistema Caña SOCA es uno de los procesos más importantes de entre los que producen entradas al sistema CAÑA TOTAL (AGRICULTURA). Quedan de manifiesto los impactos relacionados al uso de agroquímicos sintéticos, en general, en las categorías ARA, OP, THP, EAM, ET y POP. Se destaca la urea (color naranja) en varias categorías y la atrazina en OP. Los impactos directos del sistema Caña SOCA es decir los que no derivan de otros sistemas asociados a Caña SOCA, influyen significativamente en las categorías AP, NP y EAF. Se observa que la categoría de impacto GWP resulta “positiva” por ser este sistema un sumidero de carbono.

En la Figura 10 se observa el perfil del azúcar blanco común tipo A que sale del sistema INGENIO. El perfil incluye la información ambiental de los procesos aguas arriba, entre los que se cuenta la producción de la caña (sistema CAÑA TOTAL). La categoría de impacto GWP presenta aún un valor “positivo” pero la contribución “negativa” comienza a tener más importancia debido a las emisiones durante la fabricación. Sobresalen los colores que representan al sistema INGENIO propiamente y a la contribución de la caña, especialmente en las categorías AP, NP y THP. El consumo de gas natural aparece en las categorías ARA y OP, mientras que el uso de aceites lubricantes (verde oscuro) contribuye a las categorías ARA, OP, THP y EAM.

La Figura 11 muestra el perfil del etanol anhidro como salida del sistema DESTILERÍA. Los impactos acarreados por la producción de melaza son perjudiciales en todas las categorías salvo en la categoría GWP, donde es “positivo”. Los impactos directos de la destilería se manifiestan principalmente en las categorías THP, POP, GWP y ET.

CONCLUSIONES

El presente trabajo constituye una contribución a la evaluación del perfil ambiental de la cadena de valor de la caña de azúcar de Tucumán usando el enfoque del LCA, una técnica de vanguardia. Con este estudio queda claro que el impacto ambiental de la actividad abarca una serie de categorías ambientales que va más allá de la consideración de emisiones de gases de efecto invernadero.

El análisis de los resultados permite extraer importantes conclusiones desde una perspectiva sistémica de la actividad y no sólo puntual. Específicamente, este estudio muestra que gran parte de los impactos asociados a los productos de interés –azúcar y alcohol– se deben a las prácticas agrícolas. El estudio ha permitido detectar el uso de fertilizantes nitrogenados de origen fósil y el uso de combustibles fósiles para el accionamiento de la maquinaria como puntos críticos. Es así que la propuesta de mejoras debería ir en la línea del uso de fertilizantes de menor impacto (compost) y tal vez de biocombustibles en vez de combustibles fósiles. Del estudio también queda clara la necesidad de mejorar la eficiencia del lavado de los gases de combustión de calderas (*scrubbers*) y de adecuar las instalaciones para recuperar el CO₂ generado en la fermentación en cubas abiertas.

El trabajo futuro prevé el estudio del perfil ambiental de la actividad sucroalcoholera luego de implementar mejoras potenciales sobre el actual perfil ambiental: combustión del RAC en calderas, captura del CO₂ generado, inclusión de diferentes tratamientos para la vinaza, entre otros. Téngase en cuenta que una de las principales limitaciones de la metodología empleada es el volumen de datos que se requiere y el gran número de suposiciones que deben hacerse durante el estudio, máxime cuando no existe una base de datos unificada de las actividades relacionadas a la cadena de valor de la caña de azúcar.

La cadena de valor de la caña de azúcar supone un sistema complejo de interacciones de flujos de materia y de energía además de económicos y sociales, cuyo impacto ambiental es desde hace tiempo imperioso determinar. El LCA ofrece una visión sistémica adecuada para realizar esta determinación.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

(1) Amores M.J., Mele F.D., Jiménez, L., and Castells, F. 2013. Life cycle assessment of fuel ethanol from sugarcane in Argentina. Int. Journal of Life Cycle Assessment 18: 1344-1357.

- (2) Beeharry R.P. 2001. Carbon balance of sugarcane bioenergy systems. *Biomasa & Bioenergy* 20: 361-370.
- (3) Centro Azucarero Argentino. 2 de noviembre de 2014. www.centroazucarero.com.ar.
- (4) Chauhan M.K., Chaudhary V.S., and Kumar S.S. 2011. Life cycle assessment of sugar industry: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15: 3445-3453.
- (5) Guinée J.B., Gorée M., Heijungs R., Huppes G., Kleijn R., Koning A. de, Oers L. van, Wegener Sleeswijk A., Suh S., Udo de Haes H.A., Bruijn H. de, Duin R. van, Huijbregts M.A.J. 2002. Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards. Part III: Scientific background. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 692 pp.
- (6) Contreras A., Rosa E., Pérez M., Van Langenhove H., and Dewulf J. 2009. Comparative Life Cycle Assessment of four alternatives for using by-products of cane sugar production. *Journal of Cleaner Production* 17: 772-779.
- (7) Ecoinvent 3. Swiss Centre for Life-Cycle Inventories, 2014. www.ecoinvent.org.
- (8) Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres. 2009-2013. Reporte Agroindustrial ISSN 2346-9102 N° 34, 47, 61, 73 y 90. www.eeaoc.org.ar.
- (9) Giancola S.I., Morandi J.L., Gatti N., Di Giano S., Dowbley V., Biaggi C. Causas que afectan la adopción de tecnología en pequeños y medianos productores de caña de azúcar de la Provincia de Tucumán. Enfoque cualitativo. Buenos Aires: Ediciones INTA, 2012, 56 pp.
- (10) International Organization for Standardization (ISO). 2010. Environmental management. Life cycle assessment. Principles and framework. ISO14040: 2006. Ginebra: ISO.
- (11) International Organization for Standardization (ISO). 2010. Environmental management. Life cycle assessment. Requirements and guidelines. ISO 14044: 2006. Ginebra: ISO.
- (12) Joseph K. 2 de noviembre de 2014. USDA Foreign Agricultural Service. GAIN Report: Argentina Biofuels Annual 2014 (7/1/2014). [gain.fas.usda.gov/Recent GAIN Publications/Biofuels Annual_Buenos Aires_Argentina_7-1-2014.pdf](http://gain.fas.usda.gov/Recent%20GAIN%20Publications/Biofuels%20Annual_Buenos%20Aires_Argentina_7-1-2014.pdf).
- (13) Mele F.D., Kostin, A.M., Guillén-Gosálbez, G., and Jiménez L. 2011. Multiobjective model for more sustainable fuel supply chains. A case study of the sugarcane industry in Argentina. *Ind. Eng. Chem. Res.* 50: 4939-4958.
- (14) Nemecek T., Kägi T., and Blaser S. 2007. Life Cycle Inventories of Agricultural Production Systems. Final report ecoinvent v2.0 No.15. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Suiza. 360 pp.
- (15) Nishihara Hun A.L. 2014. Análisis de Ciclo de Vida y estudio de sensibilidad paramétrica de la industria del azúcar y del bioetanol a partir de caña de azúcar. Tesis Maestría, Fac. de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán. 139 pp.
- (16) Portocarrero R.A., Sopena R.A., and Valeiro A.H. 2011. Estimación del volumen de residuos de envases plásticos de agroquímicos generados por el cultivo de caña de azúcar en la provincia de Tucumán. *Ciencia y Tecnología de los Cultivos Industriales-Caña de Azúcar.* 1: 67-70.
- (17) Renouf M.A. 2006. LCA of Queensland cane sugar - lessons for the application of LCA to cropping systems in Australia. *In: 5th Australian Conference on Life Cycle Assessment.* Melbourne, Australia. p. 1.
- (18) Secretaría de Energía. República Argentina. 15 de noviembre de 2014. Balances Energéticos 2013. www.energia.gov.ar/contenidos/verpagina.php?idpagina=3366.
- (19) Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC). Guidelines for Life-Cycle Assessment: A 'Code of Practice'. Bruselas: SETAC publications, 1993, 73 pp.

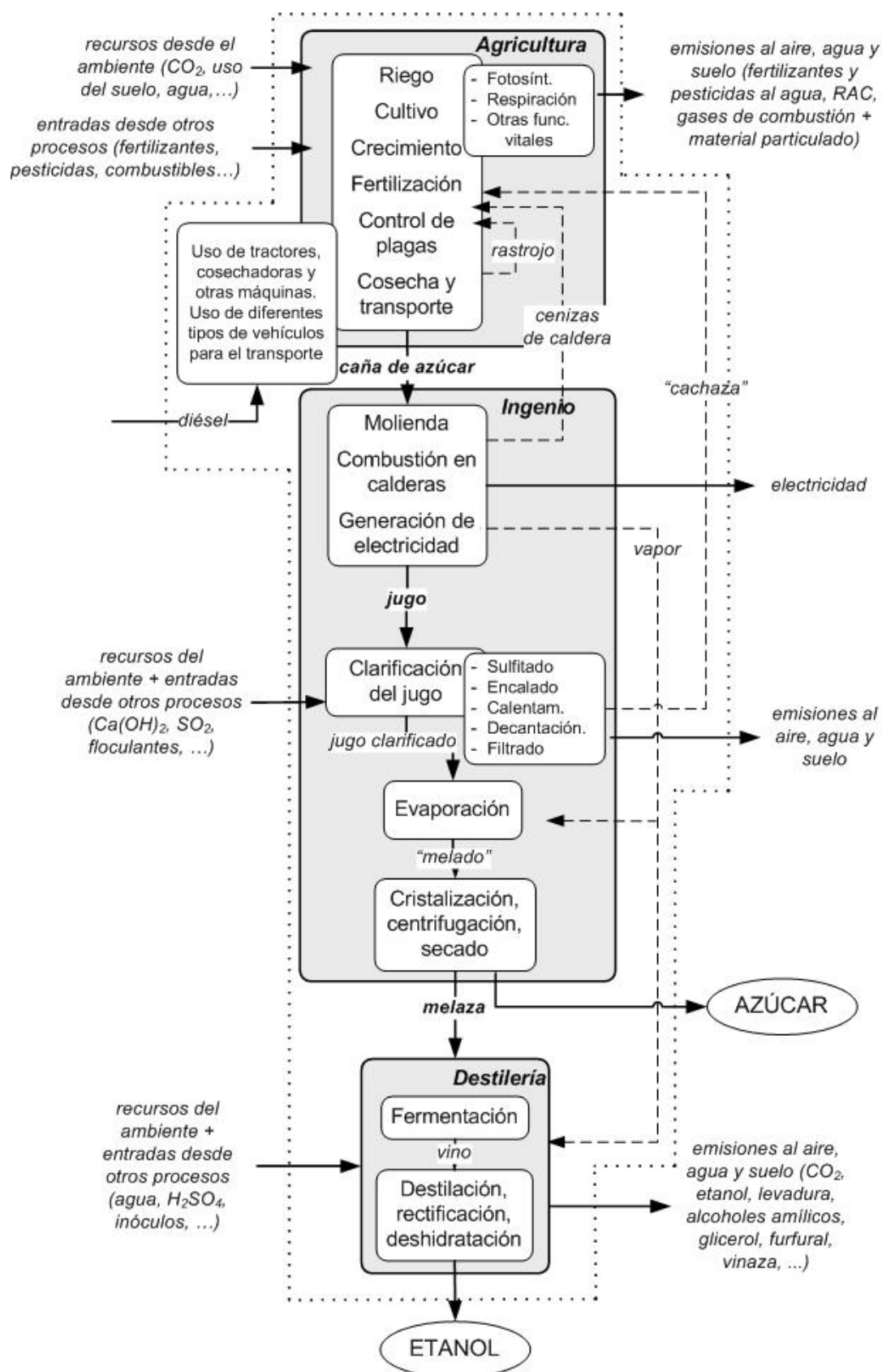


Figura 1. Representación esquemática del sistema global bajo estudio con los tres subsistemas: AGRICULTURA, INGENIO y DESTILERÍA.

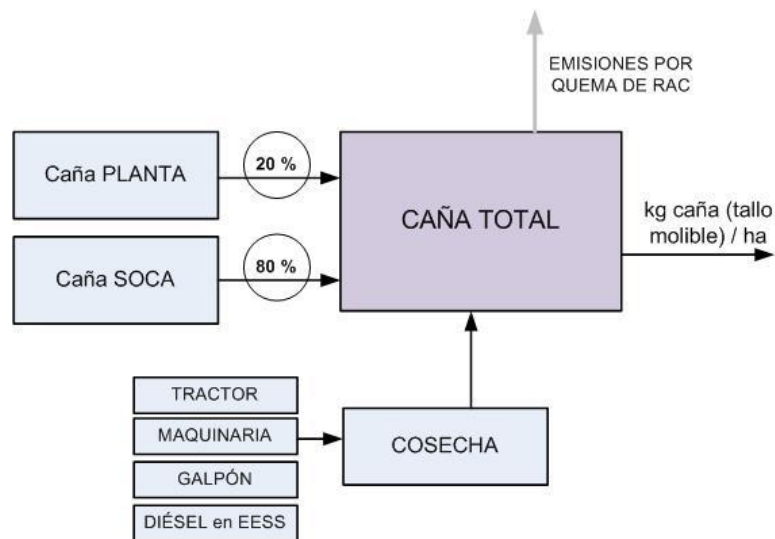


Figura 2. Proceso unitario CAÑA TOTAL. Detalle de los subsistemas que aportan cargas ambientales al sistema CAÑA TOTAL. La salida principal del subsistema son kg de caña (tallo molible) /ha.

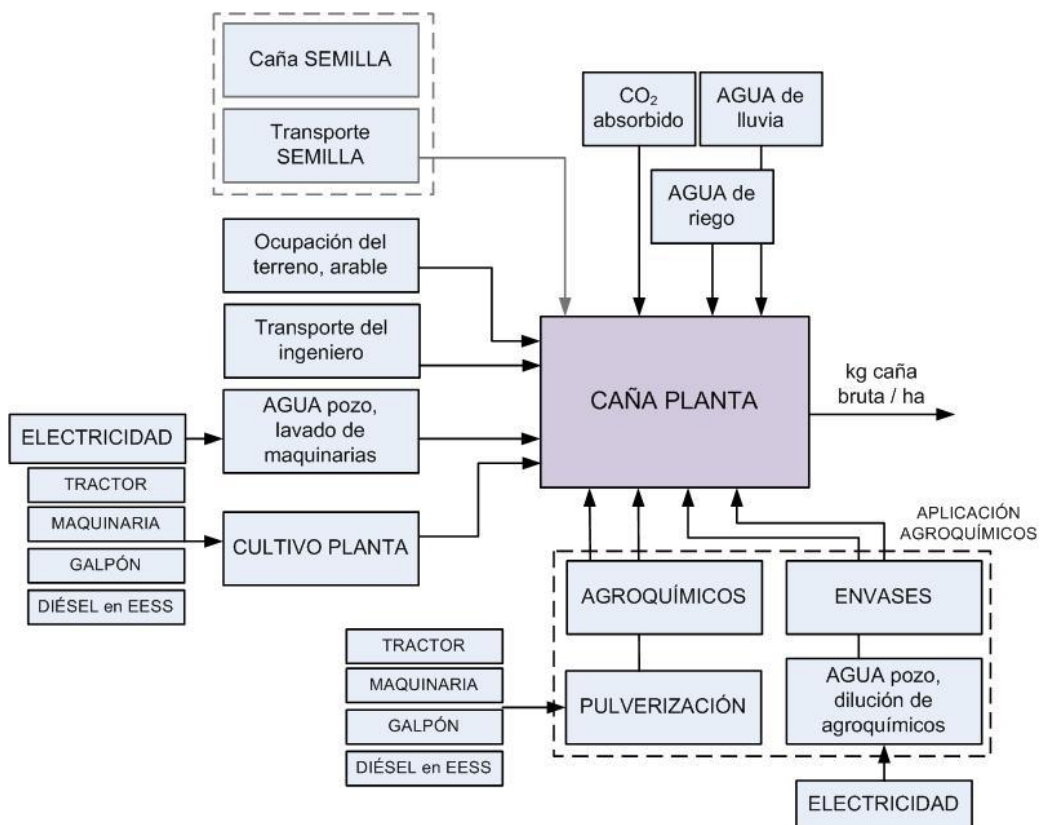


Figura 3. Proceso unitario Caña PLANTA. Detalle de los subsistemas que aportan cargas ambientales al sistema Caña PLANTA. La salida principal del subsistema son kg de caña planta bruta/ha.

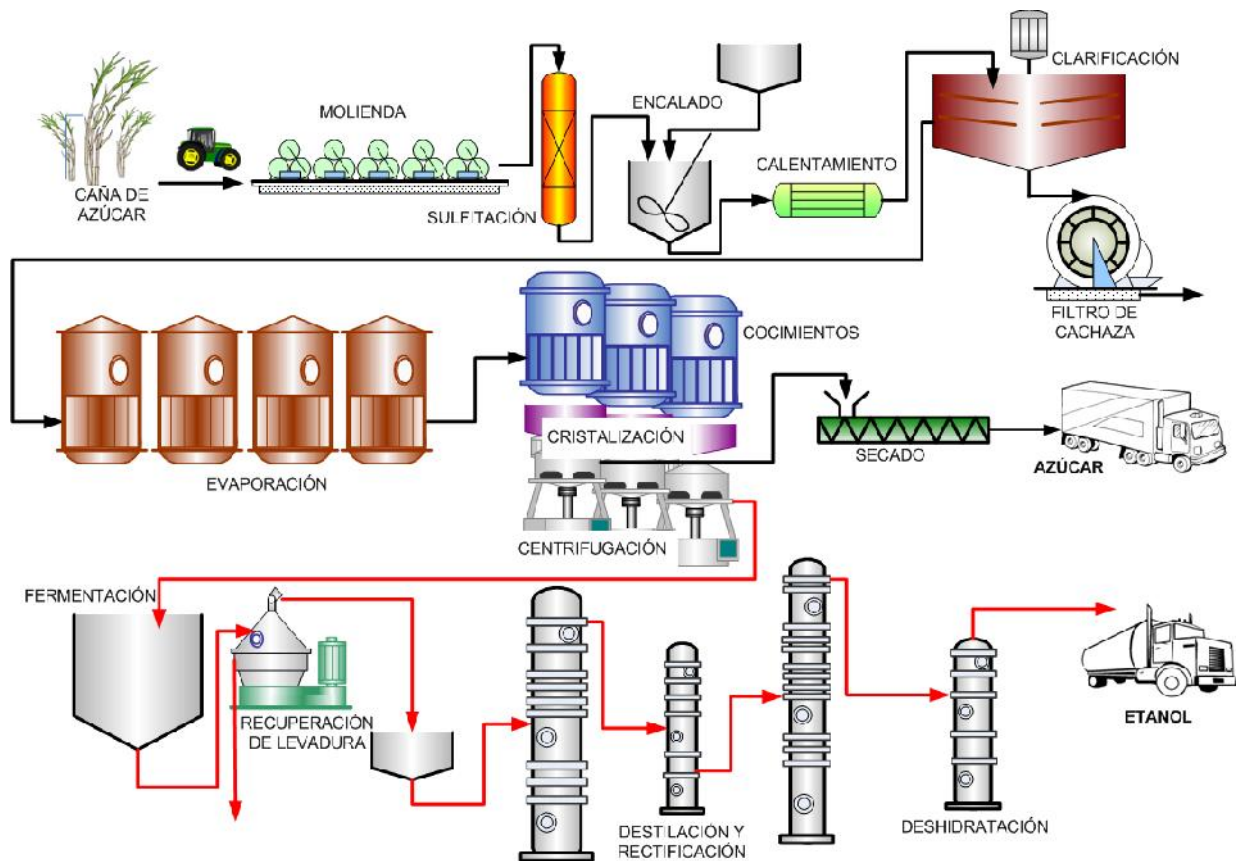


Figura 4. Diagrama del proceso industrial de elaboración de azúcar y etanol.

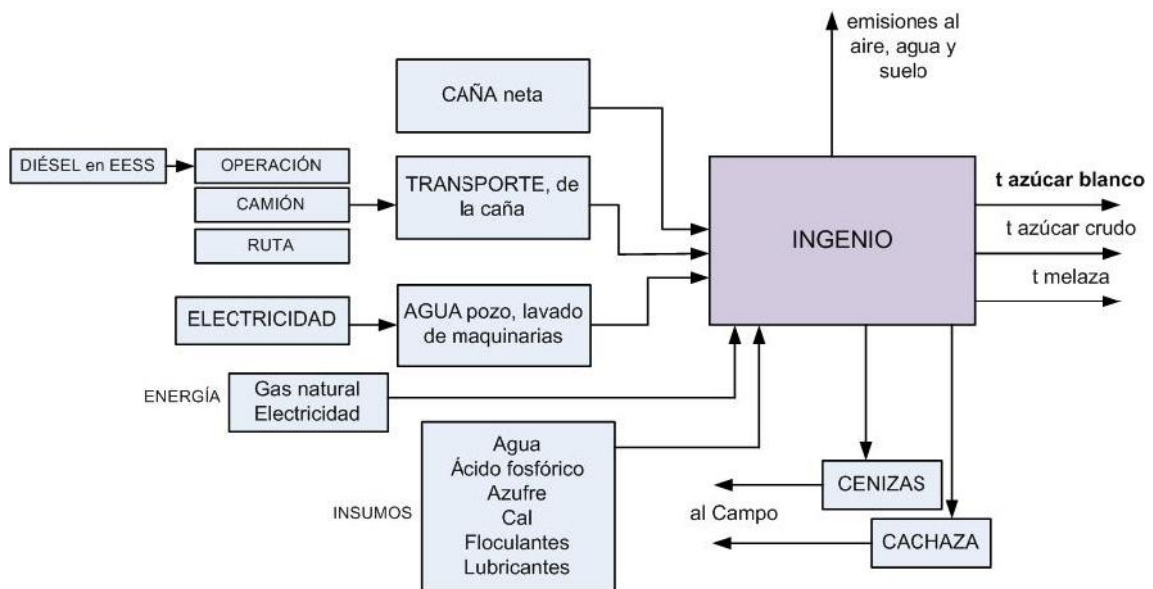
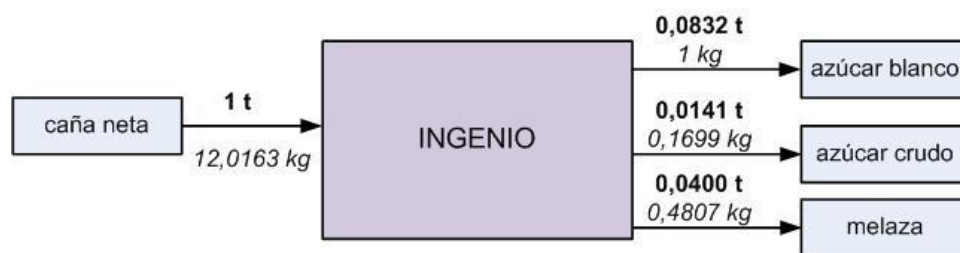


Figura 5. Proceso unitario INGENIO. Detalle de los subsistemas que aportan cargas ambientales al sistema INGENIO. La salida principal del subsistema son t de azúcar blanco. El azúcar crudo y la melaza son co-productos.



Referencias:

0,0832: cantidades referidas a 1 t de caña neta

12,0163: cantidades referidas a 1 kg de azúcar blanco

Figura 6. Asignación por masa del sistema multi-producto INGENIO. En negrita, las toneladas de co-productos que rinde 1 t de caña cosechada. En cursiva, la misma relación de masas referidas a 1 kg de azúcar blanco.

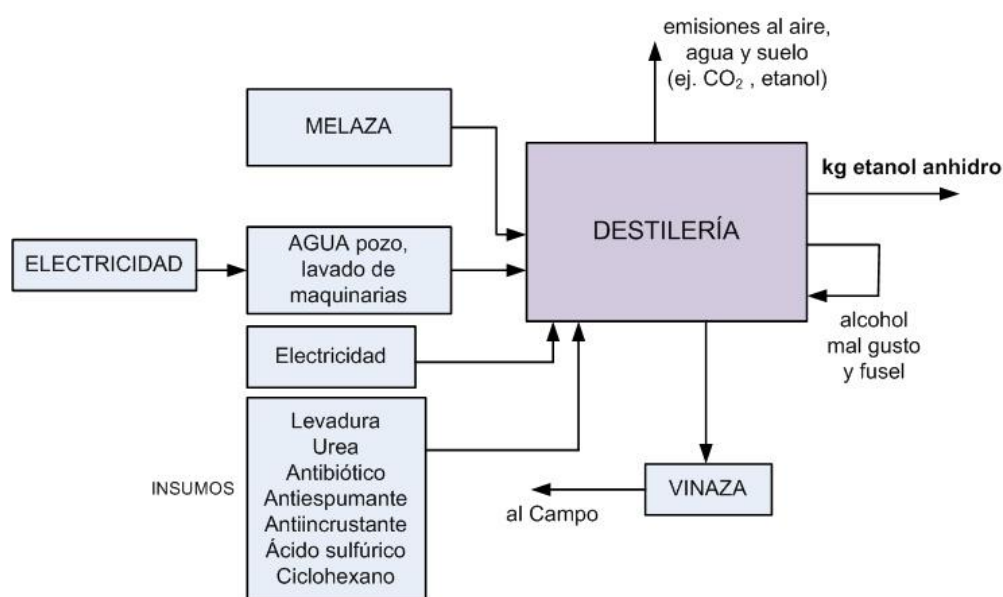


Figura 7. Proceso unitario DESTILERÍA. Detalle de los subsistemas que aportan cargas ambientales al sistema DESTILERÍA. La salida principal del subsistema son kg de etanol anhidro.



Figura 8. Perfil ambiental de la caña cosechada. Las sigla en abscisas son: agotamiento de recursos abióticos (ARA), acidificación (AP), eutrofización (NP), calentamiento global (GWP), destrucción de la capa de ozono (OP), toxicidad humana (THP), ecotoxicidad acuática de agua fresca (EAF), ecotoxicidad acuática marina (EAM), ecotoxicidad terrestre (ET) y formación de oxidantes fotoquímicos (POP).

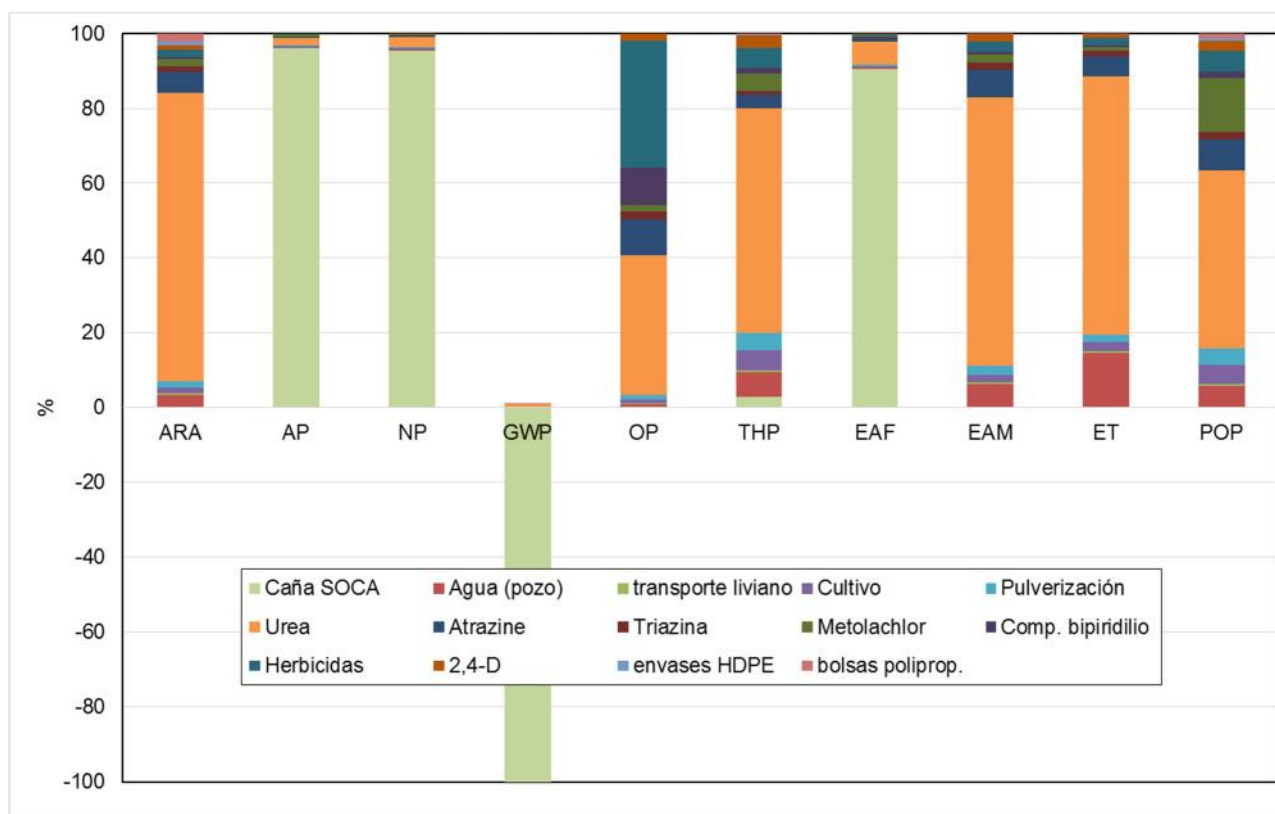


Figura 9. Perfil ambiental de la caña soca. Para la explicación de las siglas léase el título de la Figura 8.

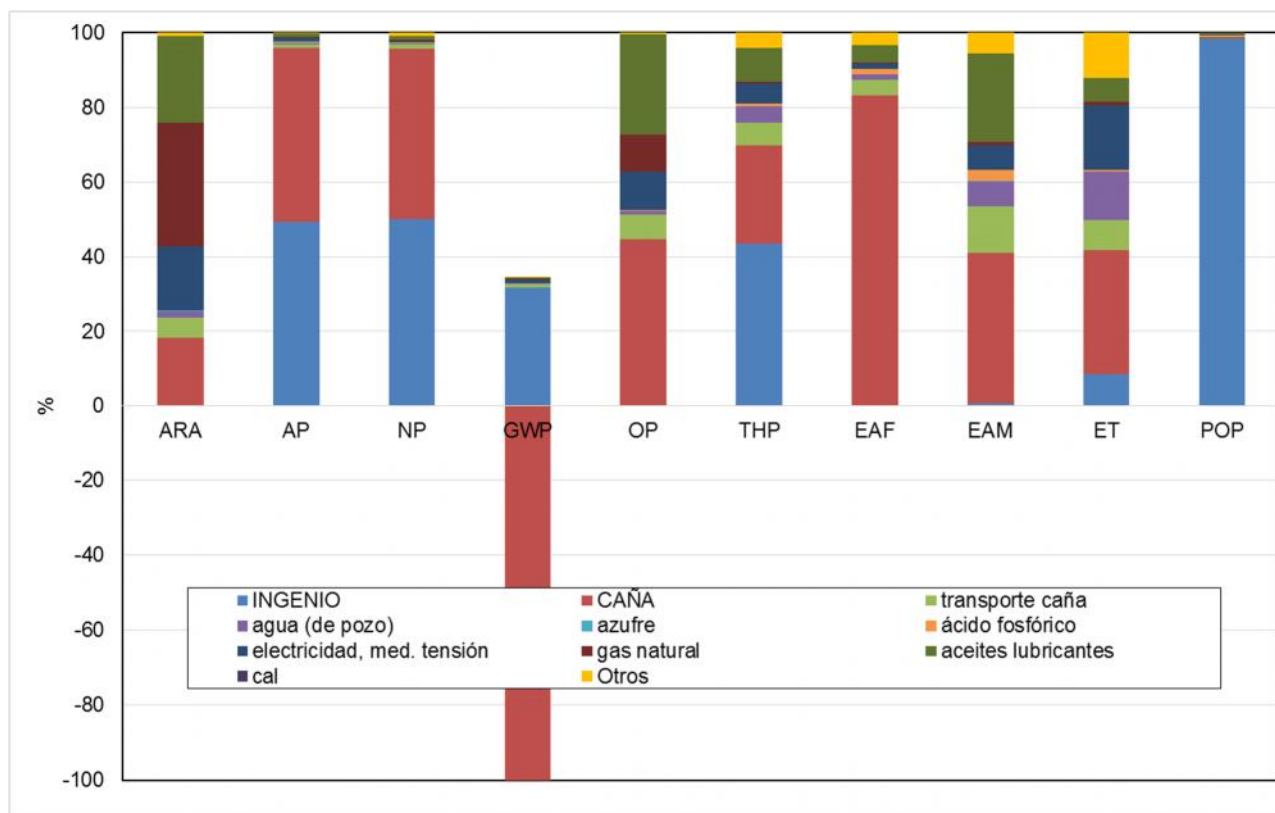


Figura 10. Perfil ambiental del azúcar blanco. Para la explicación de las siglas léase el título de la Figura 8.

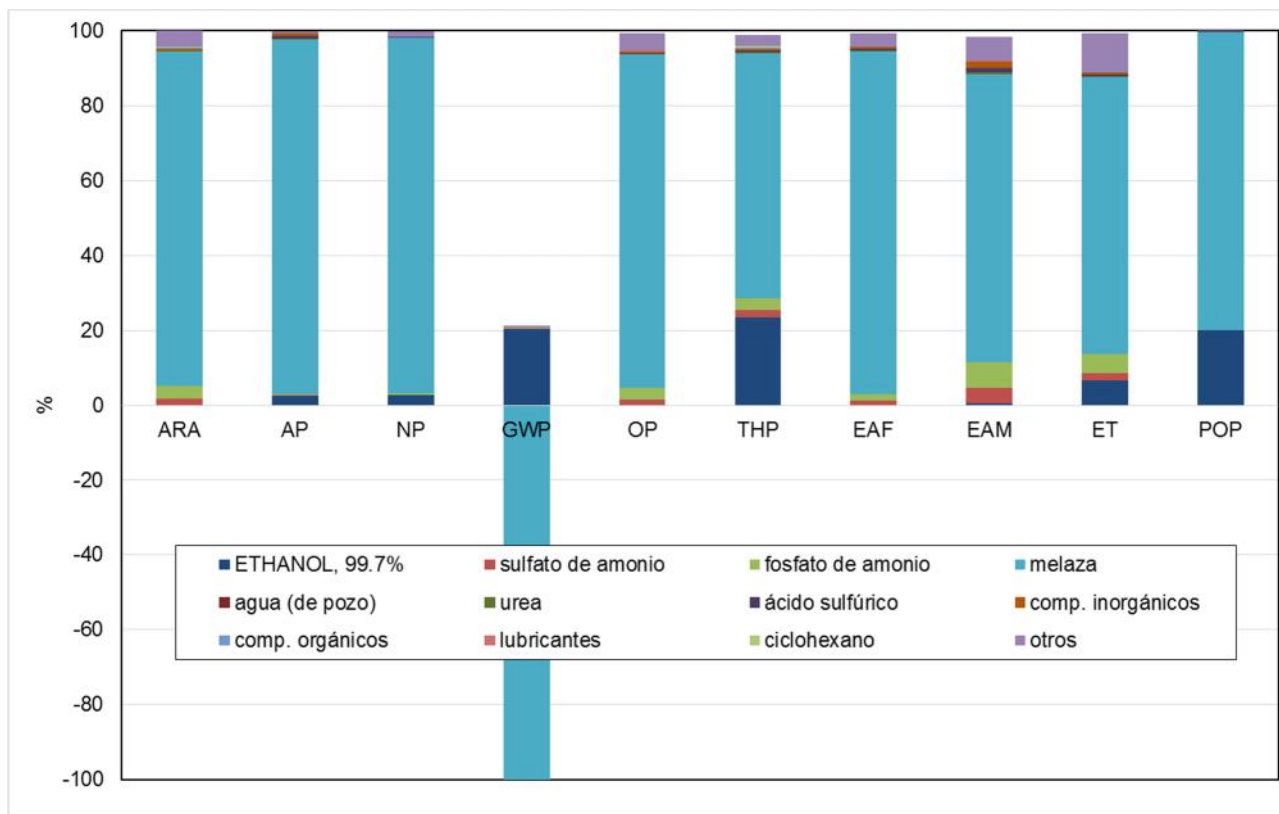


Figura 11. Perfil ambiental del etanol anhidro. Para la explicación de las siglas léase el título de la Figura 8.

Cuadro 1. Agroquímicos del sistema PLANTA.

Nombre	Dosis	Envase	Material	kg env./ha	Formulación	Dens. ^x	kg/ha princ. activo
Urea	120 kg/ha	50 kg	saco PP	1,2	46%	-	55,2
Triple Fosfato	20 kg/ha	50 kg	saco PP	0,2	50%	-	10
Atrazina	4 L/ha	20 L*	bidón HDPE	0,24	50%	1,23	2,46
Ametrina	1 kg/ha	20 L*	bidón HDPE	0,0508	50%	1,18	0,5
Acetoclor	2 L/ha	20 L*	bidón HDPE	0,12	80%	1,12	1,792

* Tomado del trabajo de Portocarrero *et al.* (16).

^x Propiedades de algunos agroquímicos: sitem.herts.ac.uk/aeru/footprint/es/index.htm (nov. 2014)

Cuadro 2. Emisiones debidas a la aplicación de agroquímicos.

<i>al Aire, debido a la aplicación de urea</i>				
	CO ₂	volatilización	% N aplicado	157,1 ^a
	N ₂ O	desnitrificación	% N aplicado	6,7 ^b
	NO _x	desnitrificación	% N aplicado	5,3 ^b
	NH ₃	volatilización	% urea N	14,9 ^b
<i>al Agua</i>				
	NO ₃ ⁻	lixiviación	% N ^b	6,5 ^b
	P	escurrimiento	% P (como P ₂ O ₅)	12,8 ^b
	pesticidas: acetoclor, ametrina, atrazina	escurrimiento	% ingrediente activo	1,5 ^b

^a Tomado de Nemecek *et al.* (p. 37) (14).

^b Tomado de Renouf (17).

Cuadro 3. Insumos de los sistemas INGENIO y DESTILERÍA.

INGENIO			DESTILERÍA	
	Por t caña	Por kg azúcar	Por kg etanol	
agua, m ³	9,39	0,1128	agua, L	0,0112
azufre, kg	0,18	0,0022	levadura, kg	2,6471·10 ⁻⁵
cal Ca(OH) ₂ , kg	1,28	0,0154	urea, kg	6,3347·10 ⁻⁴
gas natural, Nm ³	7,12	0,0856*	antibiótico, g	0,01584
electricidad, kW·h	15	0,1802	antiespumante, g	0,9388
lubricantes, kg	2,52	0,0303	antiincrustante, g	0,7513
floculantes, kg	0,08	0,0009	ácido sulfúrico, kg	0,0342
ácido fosfórico, kg	0,08	0,0010	ciclohexano, kg	7,6017·10 ⁻⁴

*2774 kJ/kg azúcar blanco (poder calorífico: 32.419 kJ/m³)

Cuadro 4. Emisiones generadas por la quema de combustible en el sistema INGENIO por kg de azúcar blanco.

	<i>fósiles (gas natural)</i>	<i>biogénicas (bagazo)</i>	<i>total</i>
CO ₂ , kg	0,1588	3,0561	3,2149
CO, kg	0,0082	0,1581	0,1663
NO _x , kg	--	0,0228	0,0228
SO ₂ , kg	--	4,0777·10 ⁻⁴	4,0777·10 ⁻⁴
partículas, kg	--	1,2016·10 ⁻³	1,2016·10 ⁻³